

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

**А. М. ФОМЕНКО, І. С. БІЛЮК, Д. Ю. ШАРЕЙКО**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання лабораторних робіт з курсу  
"ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА"**

*У двох частинах*

**Частина 1. Датчики і фільтри**

*Рекомендовано Методичною радою НУК*

Електронне видання  
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2016

УДК 681.58(076.5)  
ББК 32.965-04я73  
Ф 76

*Автори:* А. М. Фоменко, доцент НУК; І. С. Білюк, канд. техн. наук, доц.; Д. Ю. Шарейко, канд. техн. наук, доц.

*Рецензент* Р. А. Ставинський, канд. техн. наук, доц.

**Фоменко А. М.**

Ф 76    Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Елементи автоматизованого електропривода" : у 2 ч. Ч. 1. Датчики і фільтри / А. М. Фоменко, І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко. – Миколаїв : НУК, 2016. – 53 с.

У методичних вказівках охоплено розділи курсу "Елементи автоматизованого електропривода", наведено опис лабораторного обладнання, теоретичну частину та методику виконання експериментальної частини лабораторних робіт.

Призначено для студентів спеціальності 6.050702 "Електромеханіка" денної та заочної форм навчання.

УДК 681.58(076.5)  
ББК 32.965-04я73

Навчальне видання

**ФОМЕНКО** Андрій Миколайович  
**БІЛЮК** Іван Сергійович  
**ШАРЕЙКО** Дмитро Юрійович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання лабораторних робіт з курсу  
"ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА"**

*У двох частинах*

**Частина 1. Датчики і фільтри**

Редактор *А. О. Максименко*  
Комп'ютерне верстання *А. Й. Лихіна*  
Коректор *М. О. Паненко*

© Фоменко А. М., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., 2016  
© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2016

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,1. Об'єм даних 4835 кб. Тираж 15 прим.  
Вид. № 11. Зам. № 13.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, e-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

## **ПОРЯДОК ПІДГОТОВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

1. Ознайомитися з питаннями техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт (інструктаж проводить викладач на вступному занятті).
2. Вивчити опис і принцип дії лабораторного устаткування.
3. Ознайомитися з призначенням та інструкцією з експлуатації приладів і реєструючої апаратури (осцилографа, частотного аналізатора, генератора частот і т. д.).
4. Вивчити теоретичну частину відповідної роботи.
5. Ознайомитися з порядком виконання лабораторної роботи.
6. Перевірити правильність з'єднання приладів і лабораторного устаткування.
7. Підготувати необхідні теоретичні розрахунки параметрів систем. Оформлення теоретичного розрахунку і побудова графіків повинні відповідати усім вимогам ЄСКД.
8. Представити результати підготовки до роботи на перевірку викладачеві.

### **П р и м і т к а:**

1. Без перевірки викладачем результатів підготовки до роботи і його особистого дозволу вмикати живлення

**КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ!**

2. Увімкнення стенда і задання режимів його роботи здійснюється тільки викладачем або лаборантом.

# Лабораторна робота № 1

## ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИПУ ДІЇ АКУСТИЧНОГО ДАТЧИКА

**Мета роботи:** дослідження динамічних і статичних характеристик акустичного датчика.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- вивчення конструкції акустичного датчика;
- зняття і дослідження статичних характеристик акустичного датчика;
- одержання передаточної функції;
- дослідження впливу навантаження на похибку, сформовану акустичним датчиком, проблеми точності;
- опанування технікою експерименту.

### Опис лабораторного устаткування

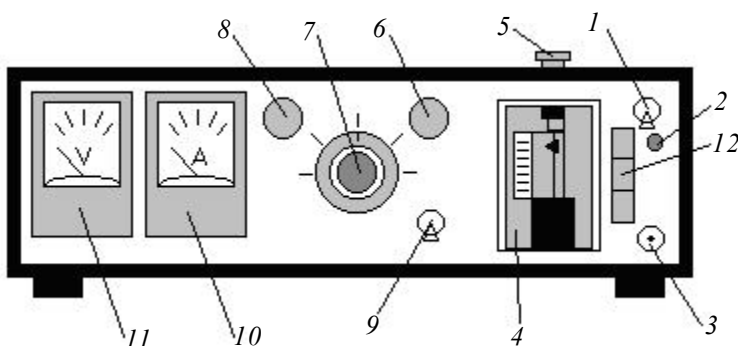


Рис. 1.1. Зовнішній вигляд стенда:

1 – мережевий вимикач; 2 – індикатор живлення; 3 – гніздо для підключення осцилографа або частотоміра; 4 – вікно індукційного датчика; 5 – ручка привода індукційного датчика; 6 – регулятор інтенсивності звуку акустичного датчика; 7 – ручка керування ємнісним датчиком; 8 – регулятор яскравості світіння лампи фотодатчика; 9 – перемикач ємності перемінна/постійна; 10 – амперметр (контролює струм лампи); 11 – вольтметр (вихідний сигнал акустичного датчика); 12 – селекторний перемикач датчиків (1. Ємнісний, 2. Індуктивний, 3. Фотодатчик)

До складу стенда входять схемні рішення, що дозволяють продемонструвати роботу датчиків і провести зняття даних для побудови характеристик (рис. 1.2).

Стенд призначений для вивчення роботи наступних датчиків: акустичного, ємнісного, індуктивного і фотодатчик.



## *Короткі теоретичні відомості*

Основною вимірюваною величиною акустики є звук, хоча існують й інші похідні від нього вимірювані величини. Насамперед, це рівень звукового тиску.

У повітрі звук є простим скупченням хвиль тиску, що переміщаються зі швидкістю приблизно  $322 \text{ мс}^{-1}$  (над рівнем моря). Ці хвилі діють у будь-якій точці простору як коливання тиску повітря. Подібні коливання необхідно зіставляти з діапазоном частот, сприйманих людським вухом (приблизно від 30 Гц до 15 кГц), тому описане явище одержало назву звуку.

Повітря – це пружне середовище. Звук може поширюватися в будь-якому іншому пружному середовищі, але в цих випадках він буде не коливанням тиску, а коливанням окремих частинок, напруги або щільності. Вони мають різну швидкість проходження в різних середовищах.

Звідси випливає, що вимірювання звуку в повітрі варто здійснювати, використовуючи перетворювачі тиску з частотними характеристиками, подібними до характеристик людського вуха. Такі прилади називаються мікрофонами.

Робота акустичного датчика демонструється за допомогою наступних систем: генератор звукового сигналу – акустичний датчик; генератор звукового сигналу – мікрофон.

Генератор зібраний за мікросхемою ДО155ЛА3, що включає 4 елементи ІІ-ІІІ. Сила звуку регулюється резистором R4, який з'єднаний у колекторному колі транзистора VT2 послідовно з динаміком.

*Як акустичний датчик використовується електродинамічний мікрофон МД200.*

Мікрофони служать для перетворення енергії повітряних звукових хвиль в енергію перемінного струму. У техніці радіомовлення і звукозапису найбільш поширені електродинамічні мікрофони.

Чутливість мікрофона визначається величиною напруги, що розвивається мікрофоном на визначеному опорі навантаження при впливі на мембрану мікрофона звукового тиску  $1 \text{ дин/см}^2$ . Одиниця вимірювання чутливості мікрофона – мВ/дин/см<sup>2</sup>.

Чутливість мікрофона на різних частотах неоднакова.

Залежність чутливості мікрофона від частоти, вираженої графічно, називається його частотною характеристикою. Смуга частот, у якій чутливість мікрофона порівняно рівномірна, є його робочим діапазоном.

Електродинамічний мікрофон (рис. 1.3) складається з постійного магніту 1, що має форму кільця (полюси його позначені буквами С і Ю), жорстко скріплених ним фланцю з магнітного матеріалу 2 і керна 3 з м'якої сталі, між якими є вузький кільцевий проміжок-зазор 4. У ньому утворюється сильне магнітне поле. Звукові хвилі впливають на мембрану 5, виготовлену з тонкого листового алюмінію, до якої приклеєна циліндрична котушка 6 з ізоляованого проводу. Ця котушка розташована в зазорі між фланцем і сердечником, але не стикається з ними.

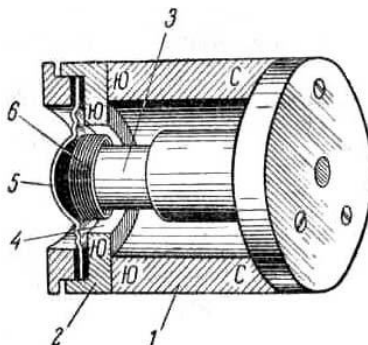


Рис. 1.3. Електродинамічний мікрофон

Коли на мембрану впливає область підвищеного тиску повітряної звукової хвилі, мембрана трохи прогинається, котушка переміщається вглиб зазору й у її обмотці індуктується струм одного напрямку. Коли ж мембрана випробує вплив області зниженого тиску звукової хвилі, він разом з котушкою рухається в зворотному напрямку й у котушці виникає струм іншого напрямку. У такий спосіб при коливаннях мембрани під дією звукових хвиль у котушці виникає перемінний струм звукової частоти. Цей струм подається на вхід підсилювача. Чим сильніший звук, що діє на мембрану мікрофона, тим сильніше вона коливається і тим більшу напругу розвиває мікрофон на вході підсилювача.

Сигнал із мікрофона надходить на вхід 4-каскадного підсилювача постійного струму. Останній каскад є емітерним повторювачем, у вихідне емітерне коло якого увімкнений вольтметр постійної напруги. Резистор R14 регулює чутливість вольтметра.

*Для акустичного датчика знімається характеристика залежності вихідної напруги від рівня звуку.*

### ***Обсяг і методика виконання роботи***

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки. Розписатися про ознайомлення з правилами в журналі реєстрації проходження інструктажу. Студенти, які не пройшли інструктаж, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

2. Ознайомитися з лабораторним стендом СЛ-1.2, а також із досліджуваними датчиками, використовуючи для цього рекомендовану викладачем літературу.

3. Привести регулятори 5, 6, 7, 8 у вихідний стан.
4. Увімкнути стенд.
5. Вивчення акустичного датчика:
  - 5.1. Змінюючи значення інтенсивності звуку за допомогою регулятора 6, зробити 15 вимірів, спостерігаючи за показаннями приладу 11.
  - 5.2. Результати вимірювань занести в табл. 1.

*Таблиця 1*

Положення регулятора															
Напруга															

- 5.3. За отриманими даними побудувати статичну характеристику акустичного датчика.
- 5.4. Провести аналіз статичної характеристики перетворювача.

### ***Зміст звіту***

1. Зробити виміри і визначити необхідні величини.
2. Побудувати статичні характеристики підсилювача.
3. Провести аналіз отриманих статичних характеристик.

### ***Контрольні питання***

1. Призначення перетворювачів.
2. Помилка і похибка.
3. Надійність.

## *Лабораторна робота № 2* **ВИВЧЕННЯ ІНДУКТИВНОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-УТВОРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА**

**Мета роботи:** дослідження динамічних і статичних характеристик вимірювально-утворювального елемента.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- вивчення конструкції індуктивних датчиків;
- зняття і дослідження статичних характеристик індуктивного датчика;
- одержання передаточної функції;
- дослідження впливу навантаження на похибку, сформовану індуктивним датчиком, проблеми точності;
- опанування технікою експерименту;

### ***Опис лабораторного устаткування***

Для проведення цієї лабораторної роботи використовується той же лабораторний стенд, що й у попередній роботі (див. рис. 1.1).

### ***Короткі теоретичні відомості***

Робота індуктивного датчика (рис. 2.1) демонструється за допомогою гетеродина (ВЧ LC-генератор), кола, що задається, в яке включена котушка перемінної індуктивності. Обертаючи ручку, ми змінюємо індуктивність  $L2$ , тим самим регулюючи глибину позитивного зворотного зв'язку і відповідно амплітуду вихідної напруги.

*Електронний генератор* – це пристрій, що перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію незатухаючих електричних коливань необхідної форми, частоти і потужності. Незатухаючі коливання в контурі автогенератора устанавливаются лише після виконання двох основних умов, що називаються умовами самозбудження.

Першу з цих умов називають умовою балансу фаз. Сутність її зводиться до того, що в схемі повинен бути встановлений саме позитивний зворотний зв'язок між вихідним і вхідним колами транзистора. Тільки в цьому випадку створюються необхідні умови для заповнення втрат енергії в контурі.

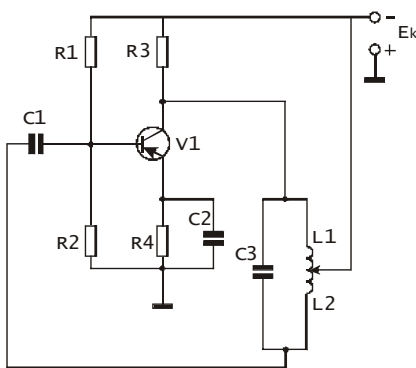


Рис. 2.1. Індуктивний датчик



На практиці виконання умови балансу фаз досягається відповідним включенням кінців котушок. Виконання умови балансу фаз є необхідним, але недостатнім для самозбудження схеми.

Друга умова самозбудження полягає в тому, що для існування автоколивального режиму ослаблення сигналу, внесене колом зворотного зв'язку, повинне компенсуватися підсилювачем. Іншими словами, глибина позитивного зворотного зв'язку повинна бути такою, щоб втрати енергії в контурі заповнювалися повністю.

### ***Обсяг і методика виконання роботи***

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки. Розписатися про ознайомлення з правилами в журналі реєстрації проходження інструктажу. Студенти, які не пройшли інструктаж, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

2. Ознайомитися з лабораторним стендом, а також із досліджуваними датчиками, використовуючи для цього рекомендовану викладачем літературу.

3. Привести регулятори 5, 6, 7, 8 у вихідний стан.

4. Увімкнути стенд.

5. Вивчити особливості індуктивного датчика:

5.1. Змінюючи кут повороту за допомогою регулятора, зробити 15 вимірів, спостерігаючи за показаннями приладу.

5.2. Результати вимірювань занести в табл. 1.

***Таблиця 1***

Кут повороту													
Вихідна величина													

5.3. За отриманими даними побудувати статичну характеристику індуктивного датчика.

5.4. Провести аналіз статичної характеристики перетворювача

### ***Зміст звіту***

1. Виміряти і визначити необхідні величини.

2. Побудувати статичні характеристики перетворювача.

3. Провести аналіз отриманих статичних характеристик.

### ***Контрольні питання***

1. Призначення перетворювачів.

2. Помилка і похибка.

3. Надійність.

### Лабораторна робота № 3

## ВИВЧЕННЯ ЄМНІСНОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-УТВОРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

**Мета роботи:** дослідження динамічних і статичних характеристик вимірювально-утворювального елемента.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- вивчення конструкції ємнісних датчиків;
- зняття і дослідження статичних характеристик ємнісного датчика;
- одержання передаточної функції;
- дослідження впливу навантаження на похибку, сформовану ємнісним датчиком, проблеми точності;
- опанування технікою експерименту.

### *Опис лабораторного устаткування*

Для проведення цієї лабораторної роботи використовується той же лабораторний стенд, що й у попередній роботі (див. рис. 1.1).

### *Короткі теоретичні відомості*

Ємнісні перетворюючі елементи перетворюють зміни вимірюваної величини в зміни ємності. Конденсатор (рис. 3.1) формується з двох пластин, розділених шаром діелектрика, а його ємність визначається за формулою

$$C = \varepsilon \frac{A}{x},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність діелектрика;  
 $A$  – площа поверхні кожної пластини;  $x$  – відстань між пластинами.

З цього співвідношення випливає, що ємність залежить від діелектричної проникності, площі поверхні пластин і відстані між ними.

Ємність такого перетворювача зазвичай вимірюється такими способами:

1) за допомогою мостової схеми перемінного струму, в якій перетворювач утворює одне плече моста;

2) за допомогою мультівібратора, в якому конденсатор у колі визначає частоту коливань.



Рис. 3.1. Ємнісний датчик

Принцип дії ємнісних перетворювачів (рис. 3.2) заснований на залежності ємності конденсатора від його геометричних розмірів, форми, відстані між його пластинами і від діелектричної проникності середовища. У ємнісних перетворювачах зазвичай використовується плоско рівнобіжний або циліндричний конденсатор.

Ємність плоскопаралельного конденсатора визначається за формулою

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d}.$$

Як видно з формули, ємність перетворювача залежить від  $S$ ,  $d$ ,  $\epsilon_r$ . Кожна з цих величин може бути вихідною величиною перетворювача.

При зміні площі взаємного перекриття пластин ємність змінюється за лінійним законом.

Ємнісні перетворювачі з перемінною площею перекриття використовуються як датчики кутових переміщень. У цьому випадку ємність дорівнює:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot (r_1^2 - r_2^2)}{2d} \cdot (\alpha_0 - \alpha),$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – зовнішній і внутрішній радіуси обкладок;  $\alpha_0$  – початковий кут перекриття.

З рис. 3.2 видно, що ємність перетворювача змінюється за лінійним законом залежно від кута  $\alpha$ . Ємнісні датчики застосовуються при вимірюванні порівняно великих кутових переміщень. Відповідним вибором форми рухомої 1 і нерухомої 2 пластинок можна одержати задану функціональну залежність між зміною ємності і кутовим переміщенням.

У коло генератора, що задається, вмикається конденсатор перемінної ємності ЦВЗ, який є ємнісним датчиком. Зміна його ємності призводить до зміни частоти звукових коливань.

### **Обсяг і методика виконання роботи**

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки. Розписатися про ознайомлення з правилами в журналі реєстрації проходження інструктажу. Студенти, які не пройшли інструктаж, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

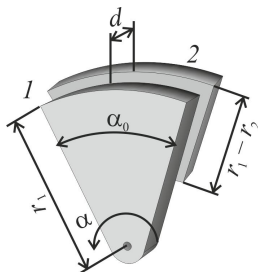


Рис. 3.2. Ємнісний перетворювач

2. Ознайомитися з лабораторним стендом, а також з досліджуваними датчиками, використовуючи для цього рекомендовану викладачем літературу.

3. Привести регулятори 5, 6, 7, 8 у вихідний стан.

4. Увімкнути стенд.

5. Вивчення ємнісного датчика:

5.1. Змінюючи відстань між пластинами конденсатора за допомогою регулятора 7, зробити 15 вимірів, спостерігаючи за показниками осцилографа (частотоміра), підключеного до гнізда 3.

5.2. Результати вимірювань занести в табл. 1.

*Таблиця 1*

Кут повороту														
Вихідна величина														

5.3. За отриманими даними побудувати статичну характеристику ємнісного акустичного датчика.

5.4. Провести аналіз статичної характеристики перетворювача.

### ***Зміст звіту***

1. Виміряти і визначити необхідні величини.

2. Побудувати статичні характеристики підсилювача.

3. Провести аналіз отриманих статичних характеристик.

### ***Контрольні питання***

1. Призначення перетворювачів.

2. Помилка і похибка.

3. Надійність.

## *Лабораторна робота № 4* **ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИПУ ДІЇ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА**

**Мета роботи:** дослідження динамічних і статичних характеристик фотоперетворювача.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- вивчення конструкції фотодатчиків;
- зняття і дослідження статичних характеристик фотодатчика;
- одержання передаточної функції;
- дослідження впливу навантаження на похибку, сформовану фотодатчиком, проблеми точності;
- опанування технікою експерименту.

### ***Опис лабораторного устаткування***

Для проведення цієї лабораторної роботи використовується той же лабораторний стенд, що й у попередній роботі (див. рис. 1.1).

### ***Короткі теоретичні відомості***

Робота фотодатчика полягає в зміні напруги фотодіода при зміні освітленості.

У регуляторі яскравості світіння електролампи використовується так званий фазоімпульсний спосіб регулювання середнього струму через навантаження. Він змінюється завдяки тому, що навантаження підключається до мережі не безпосередньо, а електронним ключем через якийсь час після появи чергової напівхвилі сіткової напруги. Змінюючи цей час, споживаний навантаженням від мережі, потужність можна регулювати практично від нуля до максимуму. Для лампи це означає зміну яскравості її світіння.

**Фотодіоди (ФД)** – це фоточутливі прилади зі структурою напівпровідникових діодів. Основу (базу) ФД (рис. 4.2) складає пластина  $n$ -германія, в яку уведений плавленням або дифузією  $p$ -індій. На границі розділу цих областей виникає електричний  $p$ - $n$ -перехід. Дія ФД заснована на фотогальванічному ефекті в опроміненному  $p$ - $n$ -переході.

**Характеристики.** У робочому стані до фотодіода підключається зворотна напруга. За відсутності оптичного випромінювання ( $\Phi = 0$ ) під дією зворотної напруги у ФД тече темновий зворотній струм. Ця залежність  $I_{\Phi} = f(U_{\text{обр}})$  при  $\Phi_1 = 0$  є зворотною галуззю ВАХ, аналогічною характеристикам звичайного напівпровідникового діода.

При висвітленні ФД ( $\Phi > 0$ ) у  $p$ - $n$ -переході і прилягаючих до нього областях кристала-напівпровідника (завдяки поглинанню квантів світла) виникає генерація електронно-дірочних пар. Під дією електричного поля контактної різниці потенціалів неосновні носії, що утворилися, ідуть з  $p$ - і  $n$ -областей (електрони з  $p$ - у  $n$ -область, а дірки у зворотному напрямку).

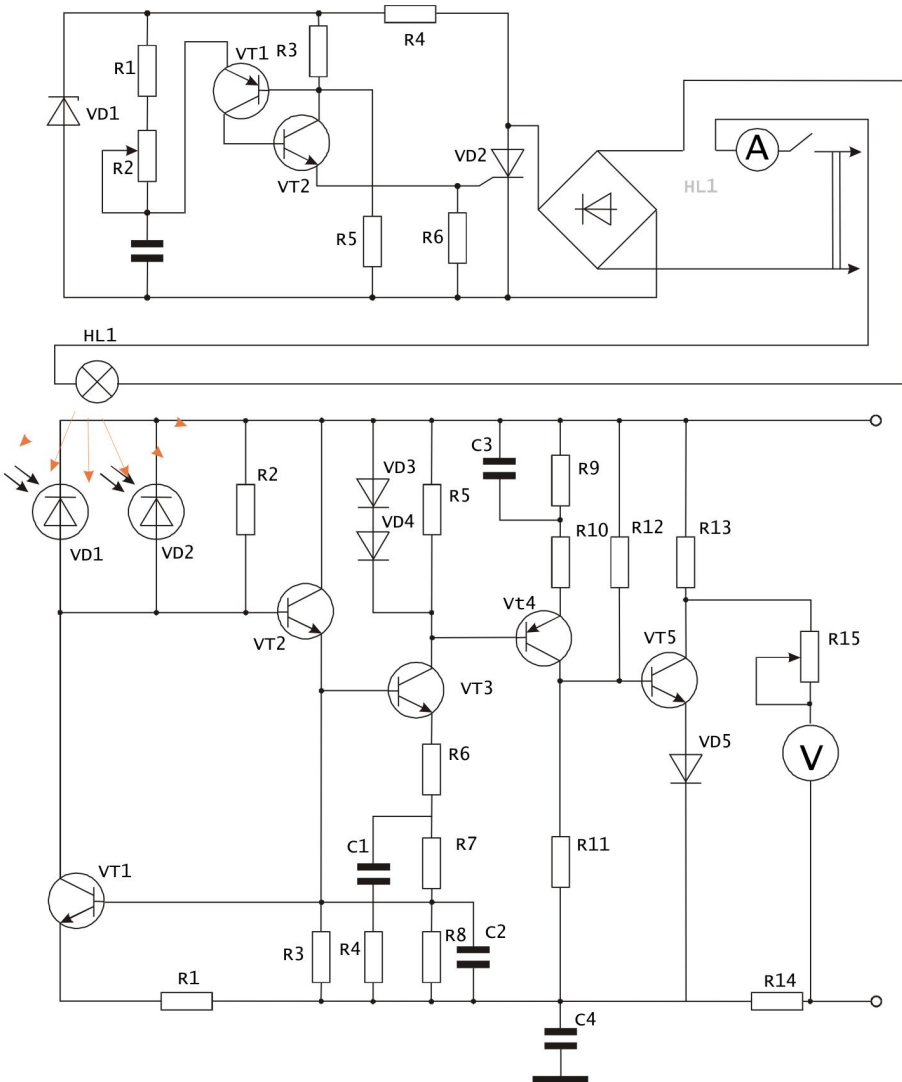


Рис. 4.1. Принципова схема стенда

При цьому область  $p$  здобуває позитивний, а область  $n$  – негативний заряд. У результаті між  $p$ - і  $n$ -областями виникає різниця потенціалів (фотогальванічний ефект), що представляє фото-ЕДС. Поле, створене цією фото-ЕДС у  $p$ - $n$ -переході, буде спрямоване назустріч полю, що виникло через контактну різницю потенціалів. У результаті висвітлення потенційний бар'єр у переході зменшиться і на величину виниклого фотоструму  $I_\phi$  зросте в ньому зворотний струм допоміжних носіїв. Характеристика порушується в область великих зворотних струмів (ВАХ при  $\Phi_2 > \Phi_1 = 0$ ). У робочому діапазоні зворотних напруг при висвітленні ФД зворотний струм практично не залежить від прикладеної зворотної напруги, тому ВАХ виходять досить згладженими.

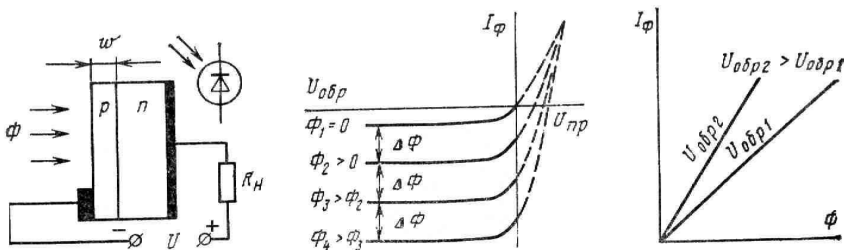


Рис. 4.2. Структура та характеристики фотодіоду

Зі збільшенням світлового потоку ( $\Phi_4 > \Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$ ) фотострум зростає лінійно, тому ВАХ при однакових збільшеннях потоку  $\Delta\Phi$  є аналогічними. При прямій напрузі електричне поле у переході не змінюється, а напрямок фотоструму залишається колишнім, але протилежним темновому струму.

*Світлові* (енергетичні) характеристики ФД представляють залежність фотоструму від освітленості  $I_\phi = f(\Phi)$  при  $U_{обр} = \text{const}$ . Вони лінійні у широкому інтервалі змін світлового потоку. Пояснюється це тим, що товщина бази діода значно менша від дифузійної довжини допоміжних носіїв. Тому всі допоміжні носії, що виникли в базі в результаті світлової генерації, досягають переходу і беруть участь в утворенні фотоструму. Утрати носіїв на рекомбінацію невеликі (через малий зміст неконтрольованих домішок) і не залежать від значення потоку.

Збільшення зворотної напруги ( $U_{обр1} > U_{обр2}$ ) викликає розширення переходу і відповідно зменшення ширини бази. При цьому менша частина допоміжних носіїв заряду встигає рекомбінуватися у товщі бази, тому фотострум у ФД збільшується.

Спектральна характеристика ФД ілюструє залежність чутливості від довжини хвилі. З боку великих довжин хвиль границя спектральної характеристики визначається шириною забороненої зони напівпровідника, а з боку коротких – товщиною області, що опромінюється, і швидкістю поверхневої рекомбінації неосновних носіїв. Положення максимуму на спектральній характеристиці залежить від швидкості росту коефіцієнта поглинання, зі зменшенням довжини хвилі. При більшій швидкості відбувається зростання, а максимум зміщується до довгохвильової границі.

У порівнянні з фоторезисторами ФД мають наступні особливості. Унаслідок лінійності світлової характеристики інтегральна чутливість ФД не залежить від прикладеної зворотної напруги. Виходячи з цього, основним параметром ФД служить не питома, а просто інтегральна чутливість  $\varepsilon_{\Pi} = I_{\Phi}/\Phi$ .

Фотодіодам властива інерційність. На інерційність ФД впливають час дифузії або дрейфу допоміжних носіїв через базу; час їх прольоту через перехід; час перезаряду бар'єрної ємності переходу (стала часу  $rC_{\text{бар}}$ ).

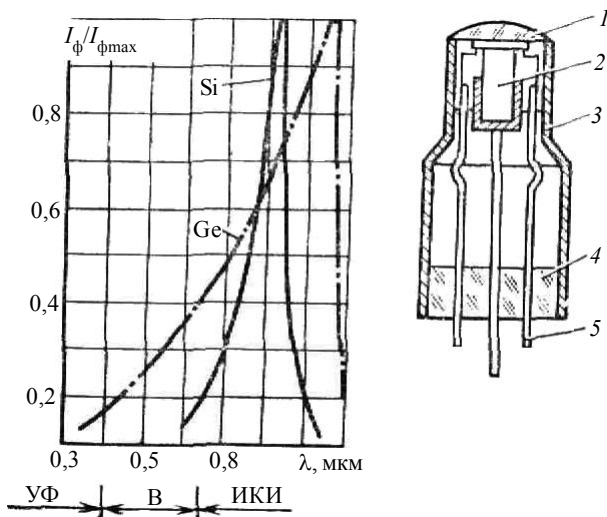


Рис. 4.3. Спектральні характеристики та будова ФД:

1 – скляна лінза; 2 – кристал; 3 – корпус; 4 – скляний ізолятор; 5 – струмовідводи

Наростання і спад фотоструму під дією світлових імпульсів відбуваються поступово. Зі збільшенням частоти проходження світлових імпульсів фронт наростання фотоструму накладається на фронт спаду від попереднього імпульсу. При деякій частоті ФД не розрізняє окремі





5.3. За отриманими даними побудувати статичну характеристику фотодатчика.

5.4. Провести аналіз статичної характеристики перетворювача.

### ***Зміст звіту***

1. Виміряти і визначити необхідні величини.
2. Побудувати статичні характеристики фотодатчика.
3. Провести аналіз отриманих статичних характеристик.

### ***Контрольні питання***

1. Призначення перетворювачів.
2. Помилка і похибка.
3. Надійність.

## *Лабораторна робота № 5* **ДОСЛІДЖЕННЯ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ**

**Мета роботи:** за допомогою експериментів визначити основні параметри крокових двигунів (КД); дати порівняльну оцінку розходження конструкцій і принципу дії КД.

У результаті виконання роботи студенти повинні вивчити конструкції різних типів КД та їх основні величини.

### **Опис лабораторного устаткування**

Функціональна схема експериментальної установки представлена на рис. 5.1.

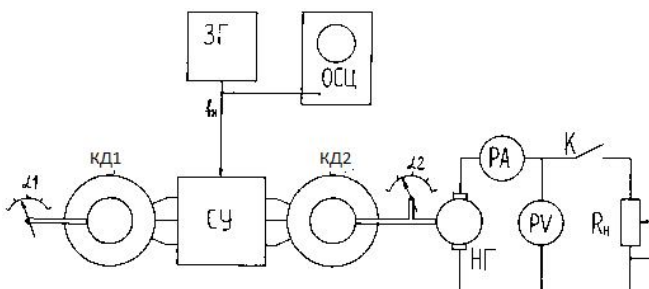


Рис. 5.1. Функціональна схема експериментальної установки

Керуючі імпульси виробляє генератор (ЗГ), що задає, частоту якого можна регулювати в широких межах. Частота проходження імпульсів визначається за допомогою осцилографа (ОСЦ). Система керування (СУ), що складається з кільцевого лічильника і підсилювача, здійснює послідовну комутацію обмоток двигунів із приходом нового імпульсу. У системі керування також наявні цифровий пульт і дешифратор, використовуючи які двигуни будуть відпрацьовувати визначену кількість імпульсів.

Таким чином, у даній роботі двигуни можуть працювати в двох режимах: режимі безперервного обертання і режимі відпрацьовування визначеної кількості імпульсів. Система керування також забезпечує відключення і реверс двигунів. У даній роботі КД1 – двигун з активним ротором, а КД2 – з реактивним ротором. Лабораторний стенд також дозволяє визначати кут повороту двигунів і вимірювати обертаючий момент двигуна з реактивним ротором за допомогою навантажувального генератора (НГ) і вимірювальних приладів.

Можливе також ручне переключення фаз двигуна з реактивним ротором шляхом натискання кнопки визначеної фази. Вигляд лицьової панелі стенда зображений на рис. 5.2.

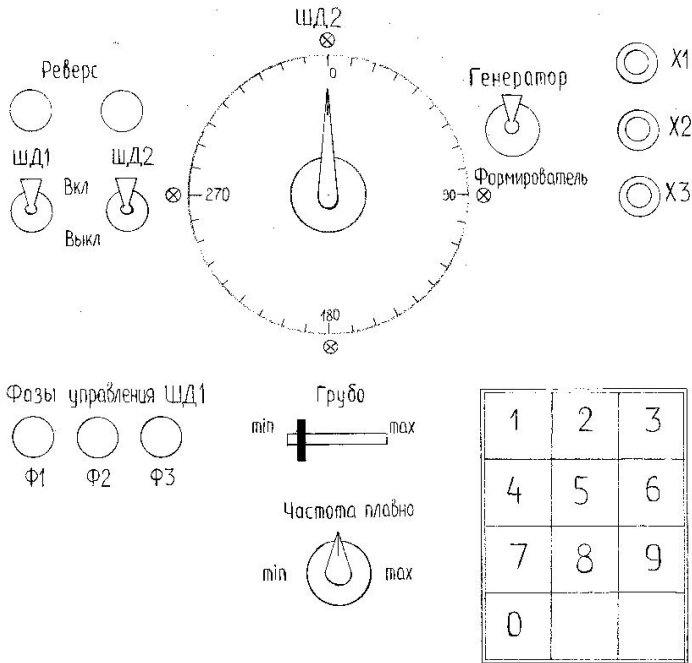


Рис. 5.2. Вигляд лицьової панелі стенда

Якщо перемикач знаходиться в режимі "Генератор", двигуни здійснюють безперервне покрокове відпрацювання імпульсів. При положенні перемикача в режимі "Формирователь" ротори двигунів нерухомі, а при натисканні якої-небудь кнопки на цифровому пульті ротор двигуна зробить відповідне число імпульсів. При цьому небажаною є тривала робота двигунів у режимі "Формирователь", тому що при знаходженні двигуна у фіксованому положенні через одну обмотку протікає значний струм, що перевантажує вихідний каскад підсилювача.

Як навантажувальний генератор використаний двигун постійного струму, що має наступні дані:  $P_H = 15 \text{ Вт}$ ,  $I_H = 1,25 \text{ А}$ ,  $U_H = 12 \text{ В}$ ,  $R_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$ .

### **Короткі теоретичні положення**

Кроковим двигуном називається електродвигун з перериваним обертанням ротора під дією дискретного електричного сигналу, що подається на обмотку керування. У ролі КД одержали широке поширення багатофазні синхронні двигуни з активним (збудженим) і реактивним (незбудженим)

роторами. Крокові двигуни застосовуються з електронним комутатором, що подає на обмотки керування прямокутні імпульси. Послідовність підключення обмоток і частота імпульсів відповідає заданій команді. Кожному імпульсові керування відповідає поворот ротора на фіксований кут, що називається кроком двигуна, величина якого строго визначена конструкцією і способом переключення обмоток. Швидкість обертання пропорційна частоті, а сумарний кут повороту – кількості імпульсів керування.

При зміні послідовності підключення до обмоток керуючих імпульсів за довільним законом кроковий двигун працює в режимі спостереження, відтворюючи складний рух з точністю до одного кроку. КД разом з комутатором можна віднести до систем частотного регулювання синхронного електродвигуна з можливістю зміни частоти від нуля. При знятті керуючих імпульсів КД фіксує кінцеві координати кутового переміщення з точністю до часток кроку без застосування датчиків зворотного зв'язку, що спрощує систему керування.

У КД з активним ротором ротор збуджується постійними магнітами або спеціальною обмоткою, що живиться постійним струмом через контактні кільця. У КД із реактивним ротором ротор без обмотки виготовляється з магнітно-м'якої сталі і має чітко виражені смуги (зубці). Багатофазні якірні обмотки (обмотки керування) розташовуються на статорі. Фазні обмотки можуть розміщуватися на одному (одностаторні конструкції двигунів), ротори яких знаходяться на одному валові. Звичайна кількість статорів дорівнює кількості фаз і не перевищує двох або трьох (дво- і тристаторні конструкції).

Розміщення обмоток керування на декількох статорах у двигунах з активним ротором у деяких випадках виявляється доцільним, тому що підвищується швидкодія. Поперечний розріз одностаторного (*а*) і двостаторного (*б*) крокових двигунів з активним ротором зображений на рис. 5.3.

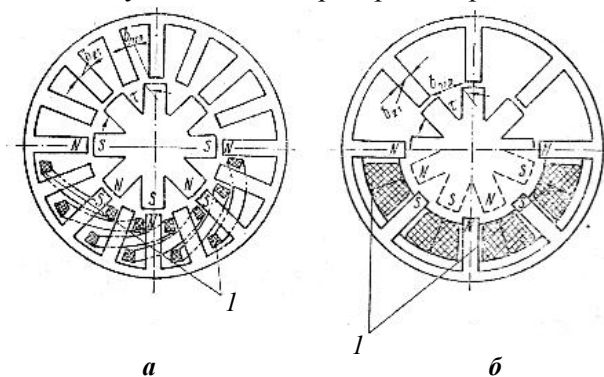


Рис. 5.3. Переріз одностаторного (*а*) і двостаторного (*б*) крокового двигуна з активним ротором: *І* – обмотки керування

Розглянемо принцип дії КД з активним ротором. При одному переключенні керуючої обмотки вісь результуючого поля зсувається на визначений кут. Ротор під дією синхронізуючого моменту відпрацьовує одиничний крок. Для наступного повороту осі поля і ротора в тому ж напрямку переключення обмоток має відбуватися в строго визначеному порядку.

Зміна напрямку обертання осі поля і реверсування ротора двигуна відбувається при зміні порядку чергування включення обмоток на зворотний. Електронний комутатор у багатофазних КД переключає обмотки в потрібній послідовності і виконує роль колектора і щіток.

Ротор реактивного КД виготовлений з магнітно-м'якої сталі. На ньому знаходяться рівномірно розташовані зубці  $Z_r$ , на статорі – гребінчасті зубцові зони, зсунуті один до одного на кут  $2\pi/mZ_p$  (де  $m$  – кількість фаз). Статор трифазного реактивного КД має шість полюсних виступів із гребінчастими зубцовими зонами (рис. 5.4). Обмотки керування можуть мати два незалежних виводи, або з'єднуватися в зірку з виведеною загальною точкою.

Особливість реактивного КД полягає в тому, що потоки, утворені постійними складовими струму в обмотках керування, не замикаються через повітряний зазор і не беруть участі в електромеханічному перетворенні енергії. Трифазні реактивні КД допускають як однополярну, так і різнополярну і несиметричну комутації. Для збільшення швидкодії КД зменшують крок двигуна шляхом використання електромагнітної редукції. Розміри зубців ротора дорівнюють розмірам зубців статора. Одна пара зубців ротора співвісна з зубцями однієї пари полюсних виступів статора, а інші зубці ротора зміщені на  $1/p$  частину зубцового розподілу стосовно зубців інших пар полюсних виступів. При надходженні чергового сигналу керування відбувається поворот МДС-статора на  $60^\circ$ , і реактивний момент повертає ротор на  $1/3$  зубцового розподілу в положення найбільшої магнітної провідності щодо збудженої пари полюсів, тобто на кут значно менший від кута повороту МДС.

Зменшення кроку двигуна дозволяє підвищити швидкість відпрацювання керуючого сигналу і частоту переривчастості. Однак використання

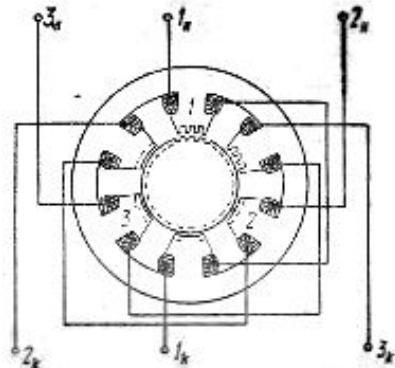


Рис. 5.4. Статор трифазного реактивного КД

електромагнітної редукції призводить до зменшення синхронізуючого моменту.

Момент реактивного КД виміряється за допомогою навантажувального генератора і визначається за формулою

$$M_{\text{эм}} = \frac{1}{2\pi n} \left[ UI + R_{\text{як}} I^2 + 2\Delta U_{\text{щ}} I + 0,008 P_{\text{н}} \left( \frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мех}} \right], \quad (1)$$

$$\text{де } n = f_{\text{имп}} \frac{\alpha}{360^\circ} - \text{частота обертання ротора КД, об/хв}; \quad (2)$$

$\alpha$  – механічний крок двигуна, град;

$f_{\text{имп}}$  – частота проходження імпульсу, Гц;

$U, I$  – напруга і струм навантажувального генератора (НГ), В, А;

$2\Delta U_{\text{щ}} = 0,4 \text{ В}$  – спадання напруги на щітках НГ;

$R_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$  – опір обмотки якоря;

$P_{\text{н}} = 15 \text{ Вт}$  – номінальна потужність НГ.

Механічні втрати  $\Delta P_{\text{мех}}$  приймаємо рівними втратам у міді:

$$\Delta P_{\text{мех}} = R_{\text{я}} \cdot I^2.$$

Механічний крок двигуна визначається відношенням різниці кутів положення ротора КД між двома сталими положеннями до кількості кроків, що були зроблені двигуном між цими двома положеннями:

$$\alpha = \frac{|\alpha_2 - \alpha_1|}{N} \quad (3)$$

де  $N$  – кількість відпрацьованих імпульсів.

### ***Обсяг і методика виконання роботи***

1. Визначити механічний крок двигуна, для чого необхідно:
  - 1.1. Підключити стенд до мережі;
  - 1.2. Увімкнути перемикач режиму роботи в положення "ФОРМИРОВАТЕЛЬ";
  - 1.3. Установити тумблери "ЩД1" і "ЩД2" у положення "ВКЛ";
  - 1.4. Установити регулятори частоти на мінімальне значення;

1.5. Зафіксувати по градусній шкалі кути початкового положення роторів двигунів ( $\alpha_1$ );

1.6. Натиснути на цифровому пульті будь-яку кнопку;

1.7. Зафіксувати по градусній шкалі кути кінцевого положення роторів ( $\alpha_2$ ) після відпрацювання двигуном  $N$  кроків;

1.8. Дані занести в табл. 1;

1.9. За формулою (3) визначити механічний крок для кожного двигуна.

2. Визначити частоту переривчастості двигунів, для чого необхідно:

2.1. Залишити увімкненим один із двигунів;

2.2. Увімкнути перемикач режиму роботи в положення "ГЕНЕРАТОР";

2.3. Підключити осцилограф на клемах  $X1$ ,  $X3$ ;

2.4. Плавню збільшувати частоту генератора доти, поки двигун не вийде із синхронізму, що буде видно по биттях або повній зупинці обертання ротора двигуна;

2.5. За допомогою осцилографа зафіксувати частоту генератора, при якій двигун вийшов із синхронізму, – це і є частота переривчастості двигуна. Дані занести в табл. 1.

2.6. Зробити ті ж дії з іншим двигуном.

*Таблиця 1*

	$\alpha_1$ , град	$\alpha_2$ , град	$N$	$\alpha$ , град	$f_{пр}$ , Гц
КД1					
КД2					

3. Визначити обертаючий момент КД із реактивним ротором за допомогою навантажувального генератора, для чого необхідно:

3.1. Залишити перемикач режиму роботи в положенні "ГЕНЕРАТОР";

3.2. Підключити осцилограф на клемах  $X1$ ,  $X3$ ;

3.3. Залишити увімкненим "ШД1";

3.4. Підключити навантажувальний реостат до навантажувального генератора. Установити реостат на максимальний опір;

3.5. Дуже плавно збільшуючи частоту генератора, довести її приблизно до 90 % від частоти переривчастості даного двигуна;

3.6. Виміряти частоту за допомогою осцилографа;

3.7. За допомогою навантажувального реостата збільшувати струм навантажувального генератора доти, поки не буде відбуватися значного зниження напруги генератора. Зафіксувати за допомогою вимірювальних приладів струм і напругу НГ;



3.8. Результати вимірів занести в табл. 2.

Таблиця 2

	$U$ , В	$I$ , А	$f$ , Гц	$n$ , об/с	$M_{\text{зм}}$ , Н·м
КД1					

3.9. За допомогою формули (1) визначити момент КД.

***Зміст звіту***

1. Зробити вимірювання за пунктами 1–3 розділів "Обсяг і методика проведення робіт" і визначити необхідні величини.

2. Зробити порівняльний аналіз отриманих даних і даних двигуна.

***Контрольні питання***

1. У чому різниця між принципами дії активних і реактивних крокових двигунів?

2. Для якого типу крокових двигунів можна зробити конструктивно механічний крок двигуна меншим?

3. Від чого залежить частота переривчастості КД?

4. Конструктивні розходження між різними типами крокових двигунів.

## *Лабораторна робота № 6* **ДОСЛІДЖЕННЯ ТАХОГЕНЕРАТОРА ЯК ДАТЧИКА ШВИДКОСТІ**

**Мета роботи:** дослідити статичні характеристики тахогенератора постійного струму у корпусі відомої конструкції двигуна постійного струму (1ПІ1209М), що застосовується в промислових роботах.

Робота передбачає виконання таких завдань:

- ознайомитися з конструкцією кріплення тахогенератора на валу двигуна;
- зняти статичні характеристики тахогенератора на холостому ходу і при роботі на навантаження;
- вивчити особливості впливу навантаження на похибку формованого тахогенератором;
- дослідити статичні характеристики тахогенератора;
- одержати передаточну функцію тахогенератора.

У результаті виконання лабораторних робіт студенти повинні засвоїти особливості дослідження тахогенератора як датчика швидкості в системах керування електроприводом.

### **Опис лабораторного стенда**

На рис. 6.1 представлений загальний вигляд лабораторного стенда для дослідження тахогенератора як датчика швидкості.

У лабораторній установці використовується високошвидкісний двигун постійного струму (1ПІ1209М), що застосовується в промислових роботах. Конструкція цього двигуна примітна тим, що тахогенератор постійного струму вмонтований у корпус двигуна і розміщений з ним на одному валу (рис. 6.2).

Увімкнення лабораторного стенда здійснюється тумблером 1. Запалена лампочка 2 сигналізує про те, що стенд увімкнений. Запуск двигуна здійснюється реостатним пуском. Вивід опору з кола якоря двигуна виробляється пакетним перемикачем 3. Вольтметром 4

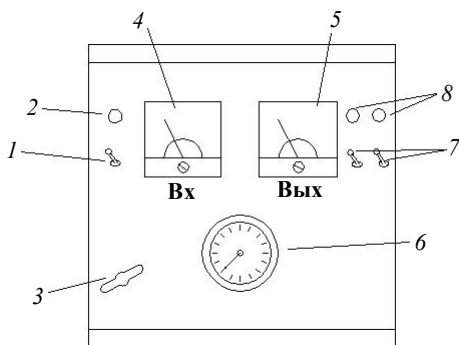


Рис. 6.1. Загальний вигляд стенда

[illegible]

### *Короткі теоретичні положення*

У системі автоматичного керування (рис. 6.3) тахогенератори (ТГ) є складеною ланкою контуру зворотного зв'язку по швидкості.

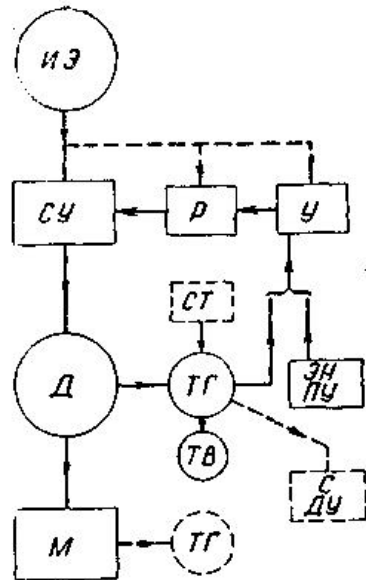
Ідеальним є такий тахогенератор, у якого величина вихідної напруги  $U_v$  строго лінійно пропорційна величині кутової швидкості  $n_d$  двигуна:

$U_b = k \cdot n_d$ . Це співвідношення не повинне залежати від пристрою зчленування, характеру навантаження, температури й інших зовнішніх факторів.

Застосовувані в промисловості реальні ТГ усіх систем як звичайні машини характеризуються низкою технічних показників і мають різні похибки, через які порушується чітка пропорційність між величинами швидкості і вихідної напруги.

Рис. 6.3 Структурна схема керованого електропривода зі зворотним зв'язком за швидкістю:

ДЕ – джерело енергії; СП – силовий керуючий пристрій; Д – двигун; М – механізм; ТГ – тахогенератор; Р – регулятор; П – підсилювач; ЕН, ПП – еталонна напруга або програмуючий пристрій; Р, ДУ – рахунковий пристрій або пристрій, що диференціює; ТВ – таховольтметр



Вибір типу ТГ у багатьох випадках може визначатися додатковими показниками, до яких відносяться:

- а) способи зчленування ТГ із двигуном;
- б) габарити, зручність монтажу і демонтажу під час ремонтування;
- в) характер обслуговування, пов'язаний з типом і конструкцією машини (наявність колектора, підшипників, регулятора струму порушення);
- г) стабільність ( $\Delta U$ ) або зміна вихідної напруги з часом (унаслідок зміни магнітних властивостей матеріалів, зміни повітряних зазорів при спрацьовуванні підшипників та інших факторів).

Різні способи приєднання тахогенераторів відповідно до їх переважного використання можуть бути перераховані в наступному порядку:

1. З'єднання вала тахогенератора з валом двигуна через напівтверду муфту.
2. Передача руху від вала двигуна до вала ТГ через зубчасту передачу.
3. З'єднання валів двигуна і тахогенератора за допомогою паскової передачі.

4. Тверде кріплення ротора (якоря) тахогенератора на кінці вала двигуна, тверде закріплення статора (корпуса) тахогенератора на кришці двигуна. У цих конструкціях тахогенератор не має своїх підшипників.

5. Тверде кріплення ротора (якоря) тахогенератора на валу двигуна. Статор (корпус) тахогенератора спирається на шарикові підшипники, що сидять на валу, і утримується від провертання.

Більш детальний опис конструктивних особливостей тахогенераторів постійного і змінного струмів, впливи навантаження і способів їхнього приєднання в схемах електроприводів на формовану похибку можна знайти в [1, 2, 3].

### ***Обсяг і методика проведення роботи***

1. Зняти статичну характеристику тахогенератора на холостому ходу, для чого необхідно:

1.1. Увімкнути лабораторний стенд за допомогою тумблера 1 (рис. 6.1);

1.2. За допомогою перемикача 3 виводити опір з кола якоря двигуна. Після кожного переключення необхідно дочекатися сталого режиму роботи тахогенератора і зафіксувати:

- напругу на щітках двигуна (вольтметр 4);
- швидкість обертання вала двигуна – вихідна координата для тахогенератора (тахометр 6);
- напругу на щітках тахогенератора – вихідна координата тахогенератора (вольтметр 5).

1.3. Пакетним перемикачем 3 ввести послідовно всі опори у колі якоря двигуна, у такий спосіб загальмовувати його.

2. Зняти статичну характеристику тахогенератора (1ПІ1209М), працюючого на різне навантаження, для чого необхідно:

2.1. Увімкнути кожен з тумблерів 7, а потім зробити переключення згідно з попереднім досвідом (п.п. 1.1 – 1.3);

2.2. Вимкнути тумблер 7 і увімкнути тумблер, що знаходиться поруч, роблячи надалі повторення досвіду (п.п. 1.1–1.3);

2.3. Увімкнути обидва тумблери 7, роблячи переключення (п.п. 1.1–1.3).

### ***Зміст звіту***

Звіт повинен містити обробку експериментальних результатів:

1. Заповнити таблицю експериментальних результатів при знятті статичних характеристик тахогенератора, працюючого на холостому ходу і під навантаженням.

$U_{дв}, В$									
$n, об/хв$									
$\omega, с^{-1}$									
$U_{тг}, В$									

2. Побудувати статичні характеристики тахогенератора, працюючого на холостому ходу і під навантаженням.

3. Описати послідовність визначення коефіцієнтів крутизни тахогенератора за статичними характеристиками.

4. Описати визначення похибок, сформованих тахогенератором. Для цих цілей бажано використовувати отримані статичні характеристики.

5. Описати конструктивні особливості досліджуваного тахогенератора.

6. Зробити висновки по роботі.

### ***Контрольні питання***

1. Що таке тахогенератор? Де застосовуються тахогенератори?

2. Які параметри характеризують тахогенератори як датчики швидкості, що використовуються в системах керування електроприводами?

3. Які фактори викликають відхилення реальної статичної характеристики тахогенератора від ідеальної?

4. Конструктивні особливості тахогенераторів змінного і постійного струмів.

## Лабораторна робота № 7

# ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРА ЧЕБИШЕВА

**Мета роботи:** дослідження динамічних характеристик фільтра Чебишева.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- знайомство з основними типами фільтрів нижніх частот;
- вивчення основних характеристик фільтра Чебишева;
- визначення мінімального порядку фільтра Чебишева;
- отримання передаточної функції фільтра Чебишева;
- отримання динамічних характеристик фільтра Чебишева.

### Основні теоретичні відомості

**1. Загальні відомості.** Електричний фільтр – це частотно-вибірний пристрій, який пропускає сигнали певних частот та затримує або послаблює сигнали інших частот. Розрізняють фільтри нижніх частот, фільтри верхніх частот, смуго-пропускаючі та смуго-загороджуючі фільтри.

Фільтр нижніх частот (ФНЧ) – це пристрій, що пропускає сигнали низьких частот та затримує сигнали високих частот. Він є базовим при аналізі та синтезі фільтрів. Інші фільтри можуть бути побудовані на основі ФНЧ.

Діапазони або смуги частот, у яких проходять сигнали, називаються смугами пропускання. У них значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) відносно велике, а в ідеальному випадку – постійне. Діапазони частот, у яких сигнали подавлюються, складають смуги затримки.

У них значення АЧХ відносно мале, а в ідеальному випадку – дорівнює нулю.

На рис. 7.1 представлено АЧХ ідеального 1 та реального 2 ФНЧ. Для ідеального ФНЧ визначається одна смуга пропускання  $0 < \omega < \omega_{зр}$  та одна смуга затримки  $\omega > \omega_{зр}$ . Частота  $\omega_{зр}$  між цими смугами визначається як частота зрізу. Для реального випадку смуга

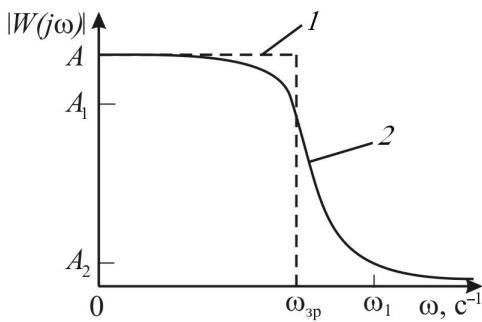


Рис. 7.1. АЧХ фільтра нижніх частот:

1 – ідеальна; 2 – реальна

пропускання визначається як інтервал частот  $0 < \omega < \omega_{зр}$ , смуга затримки – як частоти  $\omega > \omega_1$ , перехідна область – як діапазон частот  $\omega_{зр} < \omega < \omega_1$ .

На практиці неможливо реалізувати ідеальну характеристику, оскільки для цього треба сформувати дуже вузьку перехідну область. Отже, основною проблемою при конструюванні ФНЧ є наближення реальної АЧХ до ідеальної.

На практиці у якості смуги пропускання обирається діапазон частот, де значення АЧХ перевищує деяке заздалегідь визначене число  $A_1$ , а смугу затримки створює діапазон частот, у якому АЧХ менше від деякого визначеного значення  $A_2$ .

Якщо мінімальне згасання обрати за нормований рівень 0 ( $A_1$  на рис. 7.1), то логарифмічна характеристика ФНЧ має вигляд, представлений на рис. 7.2. Максимальне згасання в децибелах у смузі пропускання складає  $\alpha_1$ , а мінімальне згасання у смузі затримки –  $\alpha_2$  ( $A_1$  та  $A_2$  – відповідні значення АЧХ). Згасання  $\alpha_1$  не може перевищувати 3 дБ, тоді як типові значення  $\alpha_2$  значно більше та може знаходитися у межах  $20 \leq \alpha_2 \leq 100$  дБ (у цьому випадку маємо  $10^{-1} \geq A_2 \geq 10^{-4}$ ).

Коефіцієнт підсилення ФНЧ являє собою значення його передаточної функції при  $s = 0$  або, що еквівалентно значенню його АЧХ на частоті  $\omega = 0$ . Відповідно, коефіцієнт підсилення реального фільтра з АЧХ, представленого на рис. 7.1, дорівнює  $A$ .

Існує багато типів ФНЧ, що задовольняють набір технічних характеристик  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\omega_{зр}$  та  $\omega_1$ , що наведені на рис. 7.1, або  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\omega_{зр}$  та  $\omega_1$  – на рис. 7.2. Фільтри Баттерворта, Чебишева, інверсні Чебишева та еліптичні складають чотири найбільш відомі класи.

Характеристика фільтра Чебишева містить пульсації (коливання передачі) у смузі пропускання та монотонна у смузі затримання. На рис. 7.3 зображена характеристика фільтра Чебишева 6-го порядку. Інверсна характеристика фільтра Чебишева монотонна у смузі пропускання та має пульсації у смузі затримки (див. рис. 7.4).

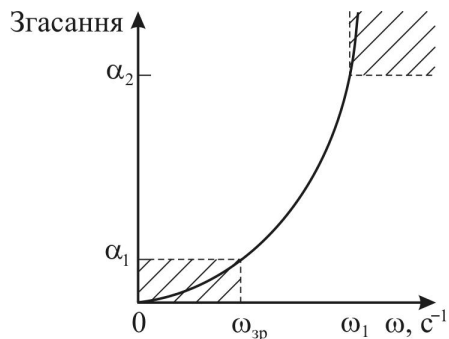


Рис. 7.2. Логарифмічна характеристика ФНЧ



АЧХ оптимального ФНЧ задовольняє позначені на рис. 7.1 та 7.2 умови для даного порядку  $n$  та допустимого відхилення у смугах пропускання та затримки при мінімальній ширині перехідної області. Таким чином, якщо задані значення  $A, A_1, A_2, n$  та  $\omega_{зр}$ , то значення частоти  $\omega_1$  мінімальне. Для поліномінальної характеристики оптимальною є характеристика фільтра Чебишева.

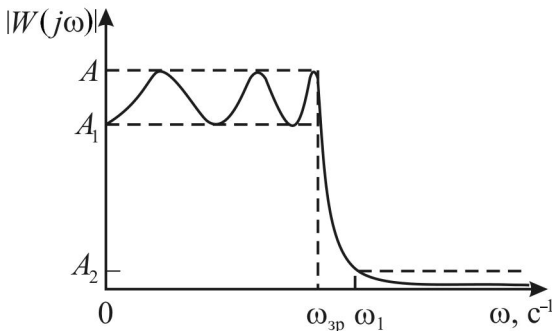


Рис. 7.3. АЧХ фільтра Чебишева 6-го порядку

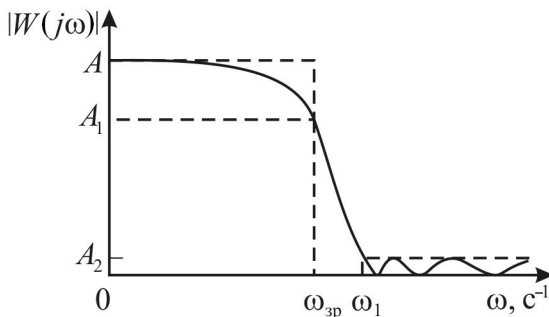


Рис. 7.4. АЧХ інверсного фільтра Чебишева 6-го порядку

Фільтр Чебишева має АЧХ, що визначається за формулою:

$$|W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega/\omega_{зр})}} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  та  $K$  – константи, параметри фільтра;  $C_n$  – поліном Чебишева першого роду ступеня  $n$ , що має вигляд:

$$C_n(x) = \cos(n \cdot \arccos x). \quad (2)$$

АЧХ досягає свого найбільшого значення  $K$  у тих точках, де  $C_n = 0$ . Оскільки ці точки розподілені по смузі пропускання, то характеристика фільтра Чебишева містить пульсації у смузі пропускання та монотонна в інших областях. Розмах пульсацій визначається параметром  $\varepsilon$ , їх кількість – ступенем  $n$ . На рис. 7.5 наведено деякі характеристики фільтра Чебишева для  $K = 1$  та  $\omega_{\text{зр}} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

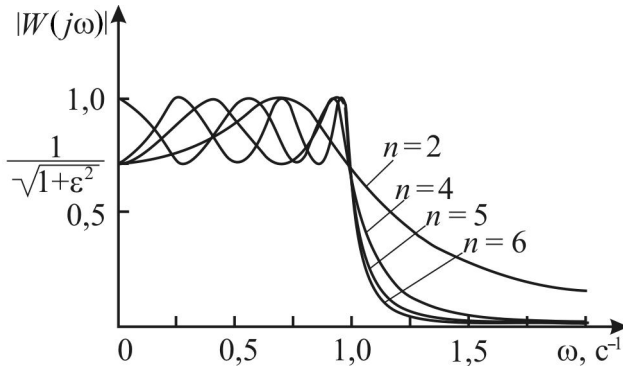


Рис. 7.5. АЧХ фільтра Чебишева нижніх частот

Фільтр Чебишева також називають рівнохвильовим фільтром, оскільки усі пульсації рівні за значенням. Для  $K = 1$  розмах пульсацій

$$RW = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}}. \quad (3)$$

Таким чином,  $RW$  можна зменшити, обравши значення параметра  $\varepsilon$  досить малим.

Мінімально допустиме згасання у смузі пропускання – постійний розмах пульсацій, часто виражається у децибелах

$$\alpha = -20 \lg \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \right) = 10 \lg (1 + \varepsilon^2), \quad (4)$$

та може використовуватися як характеристика фільтра Чебишева. Наприклад, фільтр з нерівномірністю передачі 0,5 дБ має таке значення  $\varepsilon = 0,3493$ , що  $\alpha = 0,5$ . У загальному випадку, розв'язуючи рівняння (4) відносно  $\varepsilon$ , можна отримати:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\alpha/10} - 1}. \quad (5)$$

Найбільш допустимий розмах пульсацій має фільтр Чебишева з нерівномірністю передачі 3 дБ, для якого  $\varepsilon \approx 1$ .

За АЧХ на рис. 7.5 визначаємо:

$$A = 1, \quad A_1 = 1/\sqrt{1 + \varepsilon^2}.$$

Для даного випадку також можна точно визначити  $A_2$ , що встановило б значення частоти  $\omega_1$ . Частота  $\omega_{зр} = 1 \text{ с}^{-1}$  – це точка зрізу або гранична точка смуги частот з пульсаціями. Якщо необхідно визначити частоту  $\omega_{3\text{дБ}}$ , тобто точку, в якій характеристика спадає на 3 дБ, то отримують:

$$\omega_{3\text{дБ}} = \text{ch}\left(\frac{1}{n} \text{arch} \frac{1}{\varepsilon}\right). \quad (6)$$

Необхідно зазначити, що  $\omega_{зр} = \omega_{3\text{дБ}}$ , якщо  $\omega \approx 1$ , і в цьому випадку отримуємо фільтр Чебишева з нерівномірністю передачі 3 дБ.

Передаточна функція фільтра Чебишева у загальному випадку має вигляд:

$$W(p) = \frac{Kb_0}{p^n + b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_1p + b_0}. \quad (7)$$

Для нормованого фільтра, тобто при  $\omega_{зр} = 1 \text{ с}^{-1}$ , передаточну функцію можна записати у вигляді добутку співмножників для  $n = 2, 4, 6 \dots$

$$W(p) = \prod_{k=1}^{n/2} \frac{A_k}{p^2 + a_k p + b_k}, \quad (8)$$

або для  $n = 3, 5, 7 \dots$

$$W(p) = \frac{A_0}{p + b_0} \prod_{k=1}^{(n-1)/2} \frac{A_k}{p^2 + a_k p + b_k}. \quad (9)$$

Поліноми знаменника для добутку співмножників (8) та (9) табульовані та наведені у довідниках.

ФЧХ фільтра Чебишева для 2–6-го порядків наведені на рис. 7.6. Можна відзначити, що ФЧХ фільтрів Чебишева високих порядків гірше від ФЧХ фільтрів більш низьких порядків (більш нелінійні). Це узгоджується з фактом, що АЧХ фільтра Чебишева високого порядку краще за АЧХ фільтра більш низького порядку.

**2. Вибір мінімального порядку.** Чим вищий порядок фільтра Чебишева, тим краща його АЧХ. Але більш високий порядок ускладнює

схемну реалізацію фільтра, а, отже, підвищує його вартість. Таким чином, розробник має визначити мінімально необхідний порядок фільтра, що задовольняє задані вимоги.

Припустимо, що у зображеної на рис. 7.2 загальної характеристики задані максимально допустиме згасання у смузі пропускання  $\alpha_1$  (дБ), мінімально допустиме згасання у смузі затримки  $\alpha_2$  (дБ), частота зрізу  $\omega_{зр}$  ( $\text{с}^{-1}$ ) або  $f_{зр}$  (Гц) та максимально допустима ширина перехідної області  $TW$ , що визначається наступним чином:

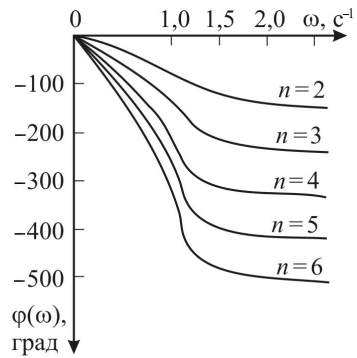


Рис. 7.6. ФЧХ фільтрів Чебишева

$$TW = \omega_1 - \omega_{зр}. \quad (10)$$

Відповідно, смуга затримки повинна починатися з деякої частоти  $\omega_2 \leq \omega_1$ .

Необхідно знайти мінімальний порядок  $n$  фільтра Чебишева, що буде задовольняти усі ці умови.

Підставивши наведені вище умови у рівняння (1) та розв'язавши його відносно  $n$ , отримаємо для  $K = 1$ :

$$n = \frac{\text{arch}\sqrt{(10^{\alpha_2/10} - 1)/(10^{\alpha_1/10} - 1)}}{\text{arch}(\omega_1/\omega_{зр})}. \quad (11)$$

Рівняння (10) можна представити у вигляді:

$$\omega_1/\omega_{зр} = (TW/\omega_{зр}) + 1. \quad (12)$$

Ця формула дозволяє визначити залежність порядку  $n$  від ширини перехідної області, а не від частоти  $\omega_1$ . Параметр  $TW/\omega_{зр}$  називається нормованою шириною перехідної області і є безрозмірним.

Нехай  $\alpha_1 = 3$  дБ,  $\alpha_2 = 20$  дБ,  $f_{зр} = 1000$  Гц, а ширина перехідної області не повинна перевищувати 300. З рівняння (12) випливає:

$$\omega_1/\omega_{зр} = (300/1000) + 1 = 1,3.$$

Мінімальний порядок фільтра Чебишева, що задовольняє ці умови,

$$n = \frac{\operatorname{arch} \sqrt{(10^2 - 1)/(10^{3/10} - 1)}}{\operatorname{arch} 1,3} = 3,95.$$

Оскільки порядок повинен бути цілим числом, то беремо ближнє найбільше ціле число  $n = 4$ .

Рівняння (11) та (12) можна використати для визначення ширини перехідної області  $TW$ :

$$\frac{TW}{\omega_{\text{зр}}} = \operatorname{ch} \left( \frac{1}{n} \operatorname{arch} \sqrt{\frac{10^{\alpha_2/10} - 1}{10^{\alpha_1/10} - 1}} \right) - 1. \quad (13)$$

Знайдемо ширини перехідної області  $TW$  для випадку  $\alpha_1 = 3$  дБ,  $\alpha_2 = 20$  дБ,  $f_{\text{зр}} = 1000$  Гц,  $n = 4$ :

$$\frac{TW}{\omega_{\text{зр}}} = \operatorname{ch} \left( \frac{1}{4} \operatorname{arch} \sqrt{\frac{10^2 - 1}{10^{3/10} - 1}} \right) - 1 = 0,293.$$

Отже,  $TW = 0,293$ ,  $\omega_{\text{зр}} = 293$  Гц. Цей результат відповідає попередньому прикладу, де  $TW \leq 300$  Гц.

**3. Визначення передаточної функції та побудова на ПЕОМ частотних характеристик фільтра Чебишева.** Для ФНЧ другого порядку з частотою зрізу  $\omega_{\text{зр}}$  типова поліноміальна передаточна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{K C \omega_{\text{зр}}^2}{p^2 + B \omega_{\text{зр}} p + C \omega_{\text{зр}}^2}, \quad (14)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення фільтра;  $B$  та  $C$  – нормовані коефіцієнти (див. табл. 1);  $\omega_{\text{зр}} = 2 \cdot \pi f_{\text{зр}}$ .

Для фільтрів більш високих порядків рівняння (14) описує передаточну функцію типової ланки другого порядку, де  $K$  – коефіцієнт підсилення ланки;  $B$  та  $C$  – коефіцієнти ланки (див. табл. 1).

Наприклад, необхідно розробити фільтр Чебишева 4-го порядку з нерівномірністю передачі  $\alpha = 0,5$  дБ, частотою зрізу  $\omega_{\text{зр}} = 1000$  Гц та коефіцієнтом передачі  $K = 4$ .

Фільтр буде складатися з двох ланок 2-го порядку з передаточною функцією, що визначається рівнянням (14). Оберемо коефіцієнт підсилення кожної ланки  $K_1 = K_2 = 2$ , щоб забезпечити необхідний коефіцієнт підсилення самого фільтра  $K = K_1 \cdot K_2 = 4$ . З табл. 1 знаходимо  $B_1 = 0,350706$  та  $C_1 = 1,063519$ ,  $B_2 = 0,846680$  та  $C_2 = 0,356412$ .

Отже, передаточна функція фільтра матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{8,397 \cdot 10^7}{p^2 + 2,204 \cdot 10^3 p + 4,199 \cdot 10^7} \cdot \frac{2,814 \cdot 10^7}{p^2 + 5,32 \cdot 10^3 p + 1,407 \cdot 10^7}.$$

АЧХ та ФЧХ фільтра представлено на рис. 7.7.

**4. Технічна реалізація фільтрів Чебишева.** Заключним етапом при проектуванні ФНЧ є його технічна реалізація. Одним із способів реалізації фільтра Чебишева другого порядку є ланка, зображена на рис. 7.8.

Ця схема реалізує передаточну функцію (14) ФНЧ з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} C\omega_{\text{зр}}^2 &= \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}; \\ B\omega_{\text{зр}} &= \frac{1}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2 C_1} (1 - K); \\ K &= 1 + \frac{R_4}{R_3}. \end{aligned} \quad (15)$$

Опори, що задовольняють систему (15), визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{2}{\left( BC_2 + \sqrt{[B^2 + 4C(K-1)] C_2^2 - 4CC_1 C_2} \right) \omega_{\text{зр}}}; \\ R_2 &= \frac{1}{CC_1 C_2 R_1 \omega_{\text{зр}}^2}; \\ R_3 &= \frac{K(R_1 + R_2)}{K-1}; \\ R_4 &= K(R_1 + R_2). \end{aligned} \quad (16)$$

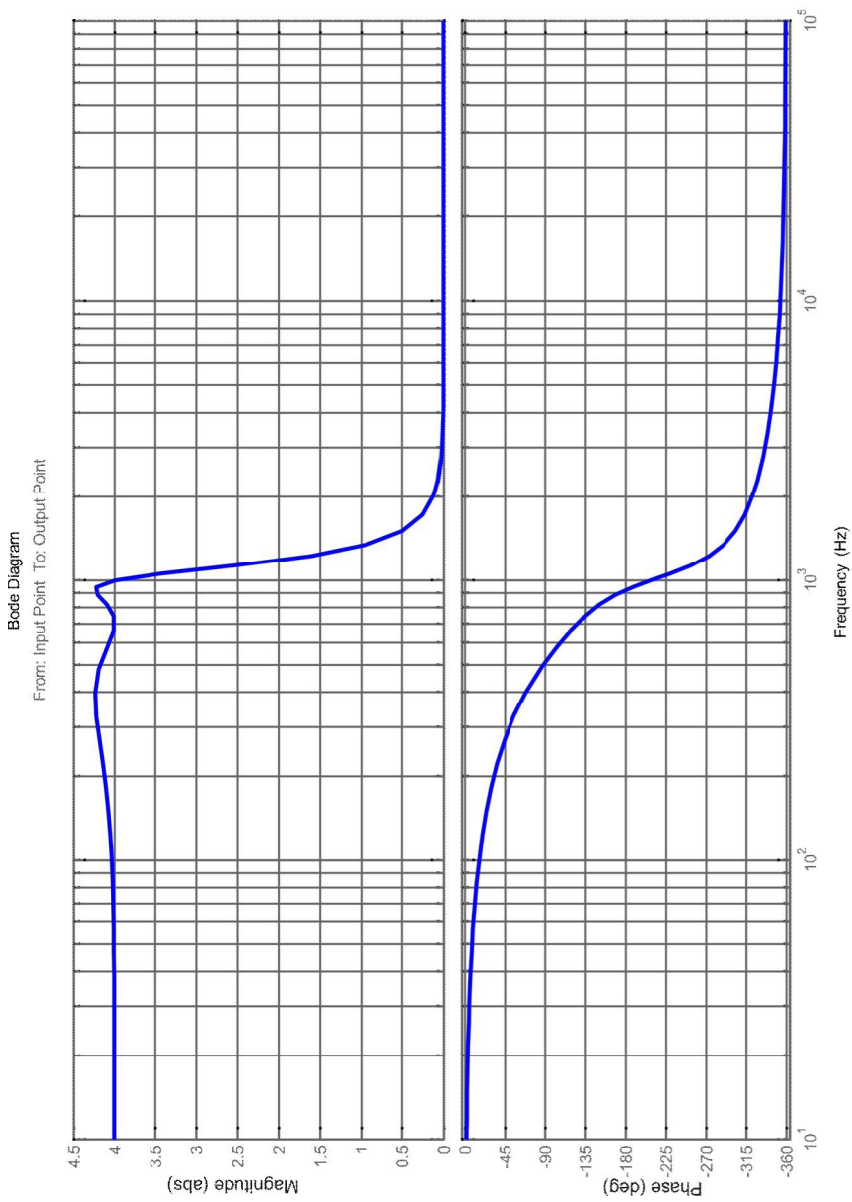


Рис. 7.7. АЧХ та ФЧХ фільтра Чебишева 4-го порядку

Для реалізації фільтра парного порядку  $n > 2$  ланки, зображені на рис. 7.8, з'єднуються каскадно.

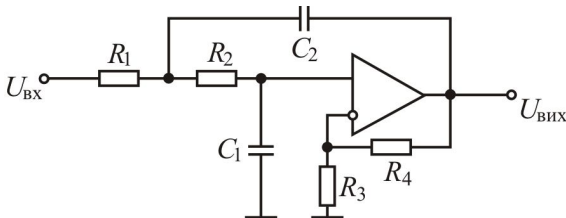


Рис. 7.8. Схема фільтра Чебишева 2-го порядку

- Методика розрахунку фільтра Чебишева полягає у наступному:
1. Визначаються нормовані коефіцієнти  $B$  та  $C$ .
  2. Обирають номінальне значення ємності  $C_2 \approx 10/f_{зр}$  (мкФ) та номінальне значення ємності  $C_1$ , що задовольняє умову:

$$C_1 \leq \frac{[B^2 + 4C(K - 1)]C_2}{4C}.$$

3. За формулами (16) розраховуємо опори  $R_1, R_2, R_3$  та  $R_4$  (для випадку  $K > 1$ . Розрахунок для інших випадків див. [1, 4]).
4. Обираємо номінальні значення опорів, найближчі до розрахованих, та реалізуємо фільтр або його ланки за схемою на рис. 7.8.

Таблиця 1. Нормовані коефіцієнти фільтрів Чебишева

Порядок фільтра	Нерівномірність передачі	Коефіцієнти	
		$B$	$C$
$n = 2$	0,1	2,372356	3,314037
	0,5	1,425625	1,516203
	1,0	1,097734	1,102510
	2,0	0,803816	0,823060
	3,0	0,644900	0,707948
$n = 4$	0,1	0,528313	1,330031
		1,275460	0,622925
	0,5	0,350706	1,063519
		0,846680	0,356412
$n = 4$	1,0	0,279072	0,986505
		0,673739	0,279398
	2,0	0,209775	0,928675
		0,506440	0,221568
	3,0	0,170341	0,903087
		0,411239	0,195980



Продовж. табл. 1

Порядок фільтра	Нерівномірність передачі	Коефіцієнти	
		<i>B</i>	<i>C</i>
<i>n</i> = 6	0,1	0,229387	1,129387
		0,626696	0,696374
		0,856083	0,263361
	0,5	0,155300	1,023023
		0,424288	0,590010
		0,579588	0,156997
	1,0	0,124362	0,990732
		0,339763	0,557720
		0,464125	0,124707
	2,0	0,093946	0,965952
		0,256666	0,532939
		0,350613	0,099926
	3,0	0,076459	0,954830
		0,208890	0,521818
		0,285349	0,088805

Таблиця 2. Вихідні дані для дослідження

Параметр	Варіант				
	1	2	3	4	5
$\alpha_1$ (дБ)	3	2	3	3	2
$\alpha_2$ (дБ)	25	20	30	30	25
$f_{зр}$ (Гц)	1000	1500	750	800	1000
$TW$ (Гц)	250	300	250	200	250
$\alpha$ (дБ)	1,0	2,0	0,5	0,1	3,0
<i>K</i>	6	9	6	9	6

### Порядок виконання роботи

1. Обрати з табл. 2 згідно з варіантом, заданим викладачем, характеристики фільтра Чебишева.

2. Для обраних характеристик визначити мінімальний порядок фільтра.

3. Для фільтра з порядком, визначеним у п. 2, обрати нормовані коефіцієнти за табл. 1 та визначити передаточну функцію.

4. Побудувати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ фільтра Чебишева у *MATLAB* / *Simulink*.

5. Виконати розрахунок параметрів електричної схеми (рис. 7.8) фільтра Чебишева для передаточної функції, визначеної у п. 3. Для визначення номінальних значень ємностей та опорів використати довідник.

6. Використовуючи формули (15), записати передаточну функцію фільтра Чебишева для параметрів, визначених у п. 5.

7. Побудувати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ фільтра Чебишева з передаточною функцією, визначеною у п. 6.

8. Порівняти характеристики, отримані у п. 4 та п. 7. Зробити висновки.

9. Для фільтра з передаточною функцією, визначеною у п. 3, за вказівкою викладача змінити коефіцієнт передачі фільтра та отримати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ. Порівняти ці характеристики з отриманими у п. 4 та зробити висновки.

### ***Зміст звіту***

Звіт повинен містити:

1. Теоретичні відомості про ФНЧ.
2. Розрахунок мінімального порядку фільтра Чебишева.
3. Передаточну функцію фільтра Чебишева.
4. Розрахунок параметрів електричної схеми фільтра Чебишева.
5. Перехідні характеристики, АЧХ та ФЧХ фільтра Чебишева, отримані у лабораторній роботі.
6. Висновки.

### ***Контрольні питання***

1. Що таке фільтр нижніх частот?
2. Які діапазони частот має ФНЧ?
3. Які існують типи ФНЧ?
4. Особливості АЧХ фільтрів Чебишева?
5. Як визначається передаточна функція фільтра Чебишева?
6. Як обирається мінімальний порядок фільтра Чебишева?
7. Як реалізовується фільтр Чебишева?
8. Як розраховуються параметри електричної схеми фільтра Чебишева?

# Лабораторна робота № 8

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРСНОГО ФІЛЬТРА ЧЕБИШЕВА

**Мета роботи:** дослідження динамічних характеристик інверсного фільтра Чебишева.

У результаті виконання роботи вирішуються наступні задачі:

- вивчення основних характеристик інверсного фільтра Чебишева;
- визначення мінімального порядку інверсного фільтра Чебишева;
- отримання передаточної функції інверсного фільтра Чебишева;
- отримання динамічних характеристик інверсного фільтра Чебишева.

### Основні теоретичні відомості

**1. Визначення мінімального порядку та передаточної функції інверсного фільтра Чебишева.** АЧХ інверсного фільтра Чебишева нижніх частот визначається наступним чином:

$$|W(j\omega)| = \frac{\varepsilon C_n(\omega/\omega_{\text{зр}})}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega/\omega_{\text{зр}})}} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – додатне стале число;  $C_n$  – поліном Чебишева;  $\omega_1$  – початкова частота смуги пропускання (див. рис. 8.1).

Частота зрізу знаходиться за формулою:

$$\omega_{\text{зр}} = \frac{\omega_1}{\text{ch}[(1/n)\text{arch}(1/\varepsilon)]}. \quad (2)$$

АЧХ інверсного фільтра Чебишева монотонна у смугі пропускання  $0 < \omega < \omega_{\text{зр}}$  та має пульсації у смугі затримки  $\omega > \omega_1$ . Пульсації рівні за значенням та складають  $A_2 = \varepsilon/\sqrt{1 + \varepsilon^2}$ . Ширина перехідної області дорівнює:

$$TW = \omega_1 - \omega_{\text{зр}}. \quad (3)$$

Якщо мінімальне згасання у смугі затримки  $\alpha_2 = -20 \lg A_2$ , то:

$$\varepsilon = 1/\sqrt{10^{\alpha_2/10} - 1}. \quad (4)$$

Отже, для заданого порядку фільтра  $n$ , мінімального згасання у смугі затримки  $\omega_2$  та частоти  $\omega_1$  можна знайти значення  $\omega$  за формулою (4),

а за формулою (1) знайти АЧХ, що вимагається. Тоді частоту  $\omega_{зр}$  та ширину перехідної області  $TW$  можна визначити за формулами (2) та (3).

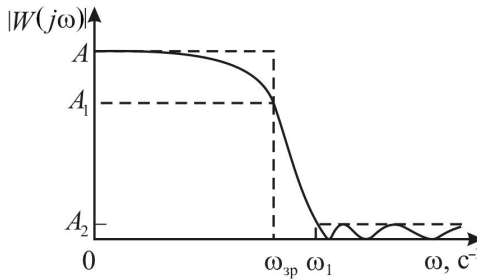


Рис. 8.1. АЧХ інверсного фільтра Чебишева 6-го порядку

Мінімальний порядок  $n$ , що забезпечує задані технічні вимоги  $\alpha_2$ ,  $\omega_{зр}$  та  $\omega_1$  згідно з формулами (2) і (4), визначається наступним чином:

$$n = \frac{\operatorname{arch} \sqrt{10^{\alpha_2/10} - 1}}{\operatorname{arch} (\omega_1/\omega_{зр})}. \quad (5)$$

Рівняння (3) можна представити у вигляді:

$$\omega_1/\omega_{зр} = (TW/\omega_{зр}) + 1. \quad (6)$$

Рівняння (5) та (6) можна використати для визначення ширини перехідної області  $TW$ :

$$\frac{TW}{\omega_{зр}} = \operatorname{ch} \left( \frac{1}{n} \operatorname{arch} \sqrt{10^{\alpha_2/10} - 1} \right) - 1. \quad (7)$$

Згідно з формулою (7) для більш вузької перехідної області потрібне більше значення порядку  $n$ , що пов'язано зі збільшенням кількості пульсацій.

Наприклад, необхідно знайти мінімальний порядок інверсного фільтра Чебишева, необхідного для реалізації наступних характеристик:  $\alpha_2 = 20$  дБ,  $f_{зр} = 1000$  Гц,  $TW \leq 300$  Гц. За формулою (6):

$$\omega_1/\omega_{зр} = (300/1000) + 1 = 1,3.$$

За формулою (5):

$$n = \frac{\operatorname{arch} \sqrt{10^{20/10} - 1}}{\operatorname{arch} (1,3)} = 3,95.$$

Таким чином, мінімальний порядок  $n = 4$ .

Знайдемо ширину перехідної області  $TW$  за формулою (7):

$$TW = \omega_{\text{зр}} \cdot \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{1}{n} \operatorname{arch} \sqrt{10^{\alpha_2/10} - 1} \right) - 1 \right] = 1000 \cdot \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{1}{4} \operatorname{arch} \sqrt{99} \right) - 1 \right] = 292 \text{ дБ.}$$

Отримані результати збігаються з результатами, отриманими для фільтра Чебишева. З цього можна зробити висновок, що для заданих припустимих відхилень у смугах затримки та пропускання і  $\omega_{\text{зр}}$  та  $TW$  фільтри Чебишева та інверсний фільтр Чебишева мають однаковий порядок. При цьому цей порядок менше необхідного порядку фільтра Баттерворта. Отже, якщо необхідна монотонна характеристика у смузі пропускання, то інверсний фільтр Чебишева за параметрами має перевагу перед фільтром Баттерворта того ж самого порядку.

Передаточна функція інверсного фільтра Чебишева у загальному випадку має вигляд:

$$W(p) = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}. \quad (8)$$

Для нормованого фільтра ( $\omega_{\text{зр}} = 1 \text{ с}^{-1}$ ) парного порядку ( $n = 2, 4, 6 \dots$ ) передаточну функцію можна записати у вигляді добутку співмножників:

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n/2} \frac{A_i (p^2 + a_i)}{p^2 + b_i p + c_i}, \quad (9)$$

а для непарного порядку ( $n = 3, 5, 7 \dots$ ):

$$W(p) = \frac{A_0}{p + c_0} \prod_{i=1}^{(i-1)/2} \frac{A_i (p^2 + a_i)}{p^2 + b_i p + c_i}, \quad (10)$$

де  $A_i$  та  $A_0$  – сталі числа;  $a_i, b_i, c_i$  – нормовані коефіцієнти (див. табл. 1).

Сталі числа  $A_i$  та  $A_0$  пов'язані з коефіцієнтом підсилення фільтра або з однією з його ланок.

Для інверсного фільтра Чебишева першого порядку маємо:

$$A_0 = K_0 c_0,$$

де  $K_0$  – коефіцієнт підсилення фільтра.

Для інверсного фільтра Чебишева другого порядку маємо:

$$A_i = K_i c_i / a_i,$$

де  $K_i$  – коефіцієнт підсилення ланки другого порядку.

Для реалізації інверсного фільтра Чебишева парного порядку необхідна ланка з передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{(p^2 + a\omega_{\text{зр}}^2)(c/a)K}{p^2 + b\omega_{\text{зр}}p + c\omega_{\text{зр}}^2}, \quad (11)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення ланки;  $a$ ,  $b$  та  $c$  – нормовані коефіцієнти (див. табл. 1);  $\omega_{\text{зр}} = 2 \cdot \pi f_{\text{зр}}$ .

Наприклад, необхідно розрахувати передаточну функцію інверсного фільтра Чебишева за наступними даними: порядок фільтра  $n = 4$ , коефіцієнт підсилення фільтра  $K = 4$ , частота зрізу  $f_{\text{зр}} = 1000$  Гц, мінімальне згасання у смузі затримки  $q = 30$  дБ.

Фільтр буде складатися з двох ланок з передаточною функцією, що визначається рівнянням (11). Оберемо коефіцієнт підсилення кожної ланки  $K_1 = K_2 = 2$ , щоб забезпечити необхідний коефіцієнт підсилення самого фільтра  $K = K_1 \cdot K_2 = 4$ . За табл. 1 знаходимо для першої ланки:  $a_1 = 2,95105$ ,  $b_1 = 0,630988$ ,  $c_1 = 1,061509$ ; для другої ланки:  $a_2 = 17,199978$ ,  $b_2 = 2,16997$ ,  $c_2 = 1,5121$ .

Отже, передаточна функція фільтра матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{0,719(p^2 + 1,165 \cdot 10^8)}{p^2 + 3,965 \cdot 10^3 p + 4,191 \cdot 10^7} \cdot \frac{0,176(p^2 + 6,79 \cdot 10^8)}{p^2 + 1,363 \cdot 10^4 p + 5,97 \cdot 10^7}.$$

АЧХ та ФЧХ фільтра представлено на рис. 8.2.

**2. Технічна реалізація інверсних фільтрів Чебишева.** Одним зі способів реалізації фільтра Чебишева другого порядку є ланка, зображена на рис. 8.3.

Ця схема реалізує передаточну функцію (11) ФНЧ з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} \frac{c}{a}K &= -\mu \frac{R_4}{R_5}; \\ a\omega_{\text{зр}}^2 &= \frac{R_5}{R_1 R_2 R_4 C_1 C_2}; \\ b\omega_{\text{зр}} &= \frac{1}{R_2 C_2}; \\ c\omega_{\text{зр}}^2 &= \frac{\mu}{R_2 R_3 C_1 C_2}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\mu = 1 + R_7/R_6$ .

# Bode Diagram

From: Input Point To: Output Point

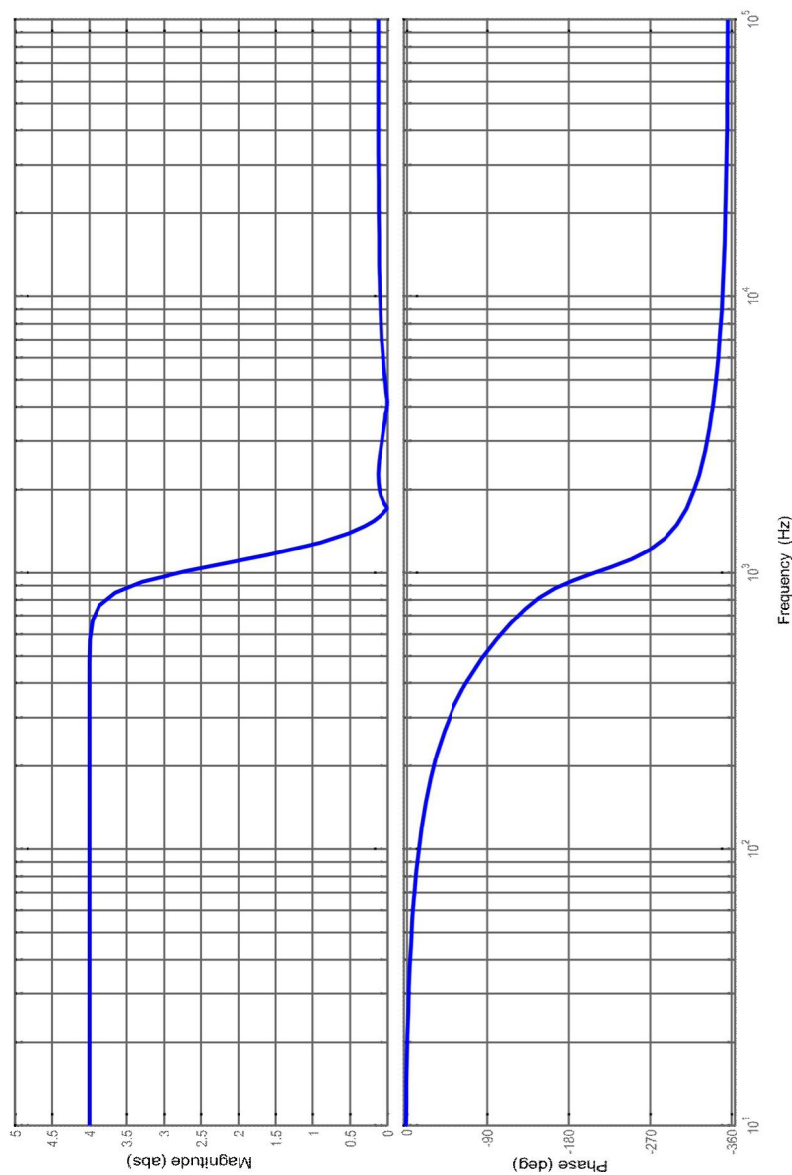


Рис. 8.2. АЧХ та ФЧХ інверсного фільтра Чебишева 4-го порядку

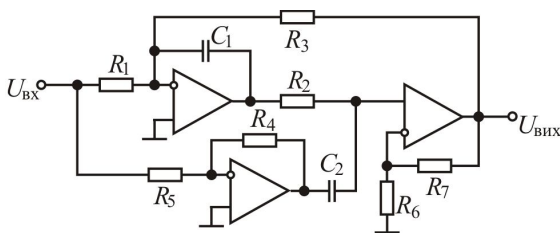


Рис. 8.3. Схема інверсного фільтра Чебишева 2-го порядку

Методика розрахунку інверсного фільтра Чебишева полягає у наступному:

1. Визначаються нормовані коефіцієнти  $a$ ,  $b$  та  $c$ .
2. Обирають номінальне значення ємності  $C_1 \approx 10/f_{зр}$ , мкФ. У випадку  $K \leq 10$  приймають  $C_2 = C_1$  (розрахунок для інших випадків див. [1, 4]).
3. За наведеними нижче формулами розраховуємо опори  $R_1 - R_7$ .

$$R_1 = \frac{\mu b}{K c \omega_{зр} C_1}; \quad R_2 = \frac{1}{b \omega_{зр} C_2}; \quad R_3 = K R_1; \quad R_4 = \frac{K c R_5}{\mu a};$$

$$R_5 = \frac{1}{\omega_{зр} C_1}; \quad R_6 = \frac{\mu R_2}{\mu - 1}; \quad R_7 = \mu R_2.$$

4. Обираємо номінальні значення опорів, найближчі до розрахованих, та реалізуємо фільтр або його ланки за схемою на рис. 8.3.

Таблиця 1. Нормовані коефіцієнти інверсних фільтрів Чебишева

Порядок фільтра	Мінімальне згасання у смузі затримки	Коефіцієнти		
		$a$	$b$	$c$
1	2	3	4	5
$n = 2$	30	32,606961	1,413164	1,031123
	40	100,995	1,414108	1,00995
	60	1000,9995	1,414213	1,000999
$n = 4$	30	2,95105 17,199978	0,630988 2,16997	1,061509 1,5121
	40	4,748478 27,676159	0,689168 2,031494	1,037463 1,26674
	60	13,690914 79,796493	0,741175 1,90616	1,012691 1,078796



Продовж. табл. 1

Порядок фільтра	Мінімальне згасання у сму- зі затримки	Коефіцієнти		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	2	3	4	5
<i>n</i> = 6	30	1,670469	0,323214	1,044801
		3,117138	1,246505	3,117138
		23,266636	2,88119	2,490873
	40	2,148655	0,379124	1,034557
		4,009446	1,33385	1,332266
		29,926909	2,558246	1,870542
	60	3,933113	0,44972	1,018594
		7,339289	1,396507	7,339289
		54,781197	2,209511	1,340934

Таблиця 2. Вихідні дані для дослідження

Параметр	Варіант				
	1	2	3	4	5
$\alpha_2$ (дБ)	25	30	35	40	30
$f_{зр}$ (Гц)	1000	800	750	600	1000
$TW$ (Гц)	200	250	250	300	300
$q$ (дБ)	30	40	60	40	30
<i>K</i>	6	9	6	9	6

### Порядок виконання роботи

1. Обрати з табл. 2 згідно з варіантом, заданим викладачем, характеристики інверсного фільтра Чебишева.

2. Для обраних характеристик визначити мінімальний порядок фільтра.

3. Для фільтра з порядком, визначеним у п. 2, обрати нормовані коефіцієнти за табл. 1 та визначити передаточну функцію.

4. Побудувати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ інверсного фільтра Чебишева у *MATLAB* / *Simulink*.

5. Виконати розрахунок параметрів електричної схеми (рис. 8.3) інверсного фільтра Чебишева для передаточної функції, визначеної у п. 3. Для визначення номінальних значень ємностей та опорів використати довідник.

6. Використовуючи формули (12), записати передаточну функцію фільтра Чебишева для параметрів, визначених у п. 5.

7. Побудувати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ інверсного фільтра Чебишева з передаточною функцією, визначеною у п. 6.

8. Порівняти характеристики, отримані у п. 4 та п. 7. Зробити висновки.

9. Для фільтра з передаточною функцією, визначеною у п. 3, за вказівкою викладача змінити коефіцієнт передачі фільтра та отримати перехідну характеристику, АЧХ та ФЧХ. Порівняти ці характеристики з отриманими у п. 4 та зробити висновки.

10. Порівняти отримані характеристики фільтра Чебишева та інверсного фільтра Чебишева. Зробити висновки.

### ***Зміст звіту***

Звіт повинен містити:

1. Теоретичні відомості про інверсні фільтри Чебишева.
2. Розрахунок мінімального порядку інверсного фільтра Чебишева.
3. Передаточну функцію інверсного фільтра Чебишева.
4. Перехідні характеристики, АЧХ та ФЧХ інверсного фільтра Чебишева, отримані у лабораторній роботі.
5. Розрахунок параметрів електричної схеми фільтра Чебишева.
6. Висновки.

### ***Контрольні питання***

1. Що таке фільтр нижніх частот?
2. Особливості характеристик інверсних фільтрів Чебишева?
3. Як визначається нормована ширина перехідної області інверсного фільтра Чебишева?
4. Як обирається мінімальний порядок інверсного фільтра Чебишева?
5. Як визначається передаточна функція інверсного фільтра Чебишева?
6. Як реалізовується інверсний фільтр Чебишева?
8. Як розраховуються параметри електричної схеми інверсного фільтра Чебишева?

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Гутников, В. С.** Фильтрация измерительных сигналов [Текст] / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

2. **Джонсон, Д.** Справочник по активным фильтрам [Текст] : [пер. с англ.] / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.

3. **Краснопрошина, А. А.** Электрические элементы системы управления промышленными работами [Текст] / А. А. Краснопрошина, В. А. Скаржена, В. Б. Яковлев. – К. : Высшая школа, 1990. – 248 с.

4. **Подлесный, Н. И.** Элементы систем автоматического управления и контроля [Текст] / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов. – К. : Высшая школа, 1982. – 476 с.

5. **Тун, А. Я.** Тахогенераторы для систем управления электроприводами [Текст] / А. Я. Тун. – М. : Энергия, 1966. – 112 с.

## ЗМІСТ

Порядок підготовки до проведення лабораторних робіт .....	3
<i>Лабораторна робота № 1. Вивчення конструкції і принципу дії акустичного датчика .....</i>	<i>4</i>
<i>Лабораторна робота № 2. Вивчення індуктивного вимірювально-утворювального елемента .....</i>	<i>9</i>
<i>Лабораторна робота № 3. Вивчення ємнісного вимірювально-утворювального елемента .....</i>	<i>11</i>
<i>Лабораторна робота № 4. Вивчення конструкції і принципу дії фотоперетворювача .....</i>	<i>14</i>
<i>Лабораторна робота № 5. Дослідження крокових двигунів .....</i>	<i>20</i>
<i>Лабораторна робота № 6. Дослідження тахогенератора як датчика швидкості .....</i>	<i>27</i>
<i>Лабораторна робота № 7. Дослідження характеристик фільтра Чебишева .....</i>	<i>32</i>
<i>Лабораторна робота № 8. Дослідження характеристик інверсного фільтра Чебишева .....</i>	<i>44</i>
Рекомендована література .....	52